

УДК 625.143 : 625.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75707

*Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу шорсткості поверхонь на трибологічні властивості контакту «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену. За результатами досліджень встановлені значення раціональної шорсткості контактуючих поверхонь, що послугує передумовою створення технології превентивного шліфування рейок для уповільнення їх зносу при русі в криволінійних ділянках колії метрополітену*

**Ключові слова:** контактні напруження, модельні зразки, раціональна шорсткість, «колесо-рейка», колія метрополітену

*Даны результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния шероховатости поверхностей на трибологические свойства контакта «колесо-рельс» в криволинейных участках пути метрополитена. По результатам исследований установлены значения рациональной шероховатости контактирующих поверхностей, что послужит предпосылкой создания технологии превентивного шлифования рельсов для замедления их износа при движении в криволинейных участках пути метрополитена*

**Ключевые слова:** контактные напряжения, модельные образцы, рациональная шероховатость, «колесо-рельс», путь метрополитена

# ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ШОРСТКОСТІ БОКОВОЇ ПОВЕРХНІ ГОЛІВКИ РЕЙКИ В КРИВОЛІНІЙНИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ

**С. В. Воронін**

Доктор технічних наук, доцент\*

E-mail: voronin.sergey@inbox.ru

**О. О. Скорик**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра «Колія та колійне господарство»\*\*

E-mail: dek\_str@ukr.net

**Є. М. Коростельов**

Аспірант\*

E-mail: kostya\_90@mail.ru

\*Кафедра «Будівельні, колійні

та вантажно-розвантажувальні машини»\*\*

\*\*Український державний університет

залізничного транспорту

майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050

## 1. Вступ

Від стабільності та довговічності складових контакту «колесо-рейка» залежить насамперед швидкість та безпека процесу перевезень на залізничному транспорті, що може гарантуватися лише підтриманням цих елементів залізничної інфраструктури в постійному «працездатному» стані [1].

Для подовження «життєвого циклу» залізничних коліс та рейок застосовуються експлуатаційні, конструкційні та трибологічні методи. Вирішення проблеми надінтенсивного зносу в контакті «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену лежить в площині трибологічних методів. З їх допомогою можна виявити закономірності контактування сил, які діють в контакті, та значення раціональних параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь, що в свою чергу дасть змогу спрогнозувати інтенсивність зношування поверхонь за різних умов контактування.

Інтенсивність зношування залежить від механічних і трибологічних факторів, які в разі контактування в криволінійних ділянках колії призводять до надінтенсивного

зношування. Повністю виключити знос контактуючих поверхонь як безумовний результат їх взаємодії неможливо, а тому залишається лише зменшувати його до деякого, бажано мінімального, значення.

Серед перспективних методів зменшення тертя та зношування в металевих парах ковзання є застосування мастильних матеріалів та надання поверхневим шарам металу відповідних механічних властивостей та мікрогеометрії. Реалізація таких методів на першому етапі потребує вивчення впливу кожного фактору (змащувальна плівка, вплив матеріалу, мікрогеометрія поверхонь). На другому етапі — встановлення комплексного впливу цих факторів на зносостійкість рейок та коліс рухомого складу.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

З метою зменшення інтенсивності зношування в контакті «колесо-рейка» останніми роками проводились дослідження, що мали на меті створення умов, за яких колеса рухомого складу та рейки будуть зношуватись якомога повільніше. Здебільшого, серед можливих шляхів для

досягнення цього, розглядалася зміна параметрів контакту. Зокрема відзначалося, що, зважаючи на високу вартість заміни зношених колес та рейок, а також трудо-затратність ремонтних робіт, вирішення таких питань є пріоритетним [2–4]. Наразі питання зменшення інтенсивності зношування в цілому для контакту «колесо-рейка» враховуючи всі особливості контактування не вирішене. Дане питання вирішується в окремих випадках для конкретного контакту [5–7]. В переважній своїй більшості дані дослідження виконувались враховуючи лише деякі характеристики контакту з великою кількістю спрощень. Також такі дослідження ускладнюються відмінностями взаємодії пар тертя «колесо-рейка» зважаючи на конструкційні, експлуатаційні та трибологічні особливості контактування, а тому потребують комплексного вирішення для конкретного типу та умов контактування.

В [8] виконано аналіз існуючих способів зменшення бокового зношування рейок в парі тертя «колесо-рейка» та визначено трибологічні методи зменшення надінтенсивного зношування бокової поверхні рейок, як найбільш ефективні для умов контактування системи «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену. Для цього слід дослідити вплив мікрогеометрії контактуючих поверхонь на коефіцієнт тертя та відповідно на інтенсивність зношування.

Вплив швидкості руху та шорсткості контактуючих поверхонь на величину напружень в контакті «колесо-рейка» був визначений для умов магістральних залізниць в роботах [9, 10]. Для контактування в коліях метрополітену, а тим паче в криволінійних ділянках колії, питання щодо визначення залежності коефіцієнта тертя від параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь залишається маловивченим з огляду на специфіку роботи пари тертя.

В [11] були визначені величини силових напружень в контакті «колесо-рейка» для умов контактування на коліях метрополітену в прямолінійних ділянках колії. Для умов контактування в криволінійних ділянках необхідно враховувати також дію бічних сил та характеристики матеріалів.

Для створення раціональних параметрів мікрогеометрії поверхонь контакту в [12] пропонується виконувати шліфування рейок. Та при виконанні шліфування необхідно враховувати особливості умов контактування та матеріалу тіл контакту, що для умов метрополітену можливо, враховуючи однотипність рухомого складу та елементів верхньої будови колії метрополітену на лініях.

Шліфування коліс [13, 14] рейок в процесі експлуатації на коліях залізниць для подовження термінів їх служби виконується вже давно [15]. Даний вид робіт спрямований здебільшого на профілювання голівки рейки та не має на меті створення певних параметрів мікрогеометрії поверхні. З огляду на цей факт необхідно уточнити методику обробки коліс та рейок при шліфуванні шляхом підбору відповідного абразивного матеріалу, який створить раціональну шорсткість.

З метою збільшення коефіцієнту тертя в контакті «колесо-рейка» та пришвидшення приробітки контактуючих поверхонь для умов кар'єрного залізничного транспорту в [12] було визначено значення раціональної шорсткості. Проте, дані дослідження проводились з метою збільшення коефіцієнту тертя шляхом надання контактуючим поверхням певної шорсткості за умов контактування в складних умовах важковагового кар'єрного залізнич-

ного транспорту для підвищення коефіцієнту зчеплення в контакті. А тому використовувати їх для визначення раціонального, з точки зору мінімуму, коефіцієнту тертя в контакті «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену не можна.

Тому перспективними представляються дослідження, що присвячені врахуванню основних сил, які діють в контакті «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену. Зокрема, з врахуванням дії бічних сил, умов контактування та характеристик матеріалів реальних тіл контакту. Раніше в [16] було змодельовано контакт «колесо-рейка» по боковій поверхні колії на машині тертя. Дана робота є продовженням та практичною реалізацією робіт [8, 16].

### 3. Цілі та задачі дослідження

Проведені дослідження виконувались з метою визначення впливу параметрів шорсткості контактуючих поверхонь колеса та рейки в криволінійних ділянках колії метрополітену на процеси їх тертя та зношування.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- визначалися величини максимальних контактних напружень, які діють в криволінійних ділянках колії метрополітену з урахуванням дії бічних сил;
- визначалися величини сил, які діють в реальному контакті «колесо-рейка» в криволінійній ділянці колії метрополітену для створення, відповідної в перерахунку, сили, яка прикладалась до «модельного контакту» на машину тертя;
- знаходились параметри раціональної шорсткості бокової поверхні голівки рейки в криволінійних ділянках колії метрополітену за критерієм мінімуму тертя та інтенсивності зношування в контакті.

### 4. Визначення раціональних параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь в трибоконтакті «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену

#### 4.1. Теоретичні дослідження з визначення раціональних параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь в контакті «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену

Встановлено, що при терті без змащення зі збільшенням ступеня шорсткості контактуючих поверхонь сила тертя зменшується [17]. В значному інтервалі зміни ступеня шорсткості сила тертя залишається постійною, і тільки при дуже грубій обробці поверхні спостерігається невелике збільшення сили тертя (рис. 1).

Закон зміни коефіцієнта тертя від шорсткості різний для тертя спокою і тертя ковзання [17]. При ковзанні коефіцієнт тертя в залежності від шорсткості переходить через мінімум. Зростання сили тертя зі зростанням шорсткості для сили тертя ковзання пояснюється тим, що дисипація енергії, яка спостерігається при ковзанні, зростає зі збільшенням шорсткості. Це зростання відбувається швидше, ніж падіння складової сил тертя, викликане зменшенням площі контакту.

Враховуючи молекулярно-механічну природу тертя [18] встановлено, що залежність між коефіцієнтом тертя і ступенем шорсткості повинна зображуватися

кривою U-образного типу. При досить чистих поверхнях пара метал-метал утворює вузли схоплювання за рахунок тісного молекулярного контакту. При цьому зміна коефіцієнта тертя в цій області буде зображуватися спадаючою ділянкою кривої. Подальше збільшення ступеня шорсткості призводить до того, що процес схоплювання не розвивається, і взаємодія поверхонь в цій області відбувається за рахунок механічного зачеплення мікронерівностей. Коефіцієнт тертя в цьому інтервалі значень параметра шорсткості буде тим більше, чим більшим буде показник шорсткості. Значенню раціональної шорсткості відповідає мінімум коефіцієнта тертя і мінімум величини зносу матеріалів (рис. 2).

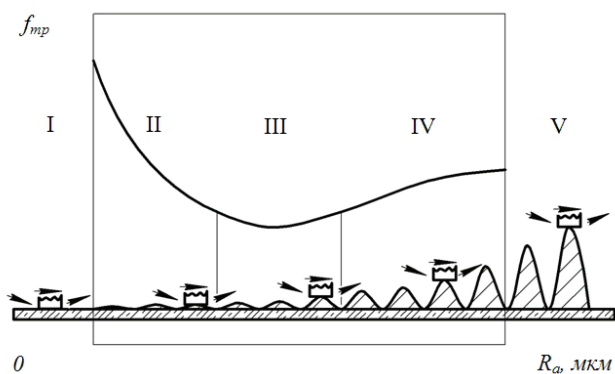


Рис. 1. Залежність сили тертя від шорсткості незмазаних контактуючих поверхонь: I — зона схоплювання; II — зона переважного молекулярного зношування; III — оптимальна зона молекулярно-кінетичного зношування; IV — зона переважного механічного зношування; V — зона мікрорізнання

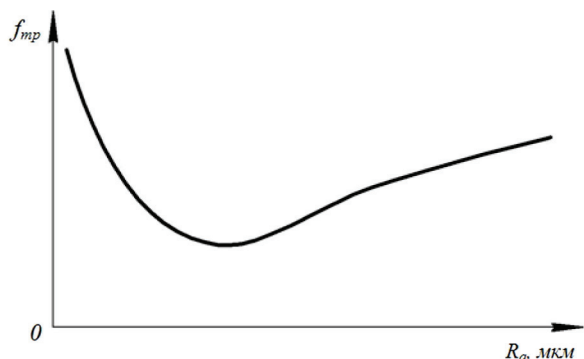


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя від шорсткості контактуючих поверхонь

Кочення колеса по рейці є кочення однієї циліндричної поверхні радіуса  $r_1$  по іншій з радіусом  $r_2$  [19].

Згідно теорії [20] з доповненнями [21], в [11] визначено максимальні контактні напруження в контакті «колесо-рейка» в прямих ділянках колії метрополітену. Так як в криволінійних ділянках колії пляма контакту має нееліптичний контакт, то величину максимальних контактних напружень слід визначати за методикою [22]. За даною методикою величину максимальних контактних напружень в криволінійній ділянці колії слід визначати шляхом врахування поправочних коефіцієнтів до аналогічних значень, розрахованих за методикою [20] з доповненнями [21] в [11] для прямої ділянки колії. Сумарна величина поправочних коефіцієнтів може складати  $2 \div 2,5$ .

Максимальні контактні напруження в контакті «колесо-рейка» в умовах метрополітену раніше були розраховані в [11], але без врахування дії бічних сил в криволінійній ділянці колії, які суттєво впливають на величину контактних напружень. Тому в даній роботі враховано дію бічних сил (рис. 3).

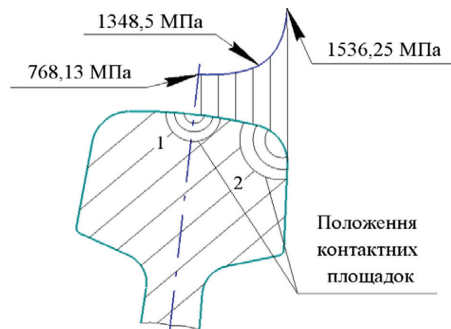


Рис. 3. Максимальні контактні напруження згідно [20–23]: 1 — контакт на поверхні катання рейки (контактування переважно в прямих ділянках колії); 2 — контакт на боковій поверхні голівки рейки (контактування переважно в криволінійних ділянках колії)

Інтенсивність зношування контактуючих поверхонь залежить від виду їх контактної взаємодії. Саме тому для більшої зносостійкості слід забезпечити пружну взаємодію контактуючих тіл.

Інтенсивність зношування  $I$  може змінюватися широкому діапазоні значень від  $10^{-3}$  до  $10^{-12}$  см<sup>3</sup>/см [14].

Розглядаючи контакт «колесо-рейка» як множинний контакт, маємо основне рівняння для розрахунку інтенсивності зношування даного контакту [24]:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{r}} \cdot \frac{p_a}{p_r} \cdot \frac{1}{n}. \quad (1)$$

Наближена формула для визначення глибини занурення нерівностей  $h$  за умов відсутності хвилястості контактуючих поверхонь має вигляд:

$$h \approx 3,4 \cdot R_a \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{p_c}{p_r}\right)}. \quad (2)$$

При цьому фактичний тиск на контактні розраховують за формулою:

$$p_r = 0,5 \cdot E^{\frac{2v}{2v+1}} \cdot \Delta^{\frac{v}{2v+1}} \cdot p_c^{\frac{1}{2v+1}}. \quad (3)$$

Контурний тиск (без врахування впливу шорсткості на деформацію хвиль):

$$p_c = 0,2 \cdot E^{0,8} \cdot \left(\frac{H_B}{R_B}\right)^{0,4} \cdot p_a^{0,2}. \quad (4)$$

Розрахувавши інтенсивності зношування в контакті «колесо-рейка» в криволінійній ділянці колії метро-

політену стане можливим вибір раціональних параметрів контактування даної системи.

#### 4. 2. Стендові випробування з визначення раціональних параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь в контакті «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену

Скористаємося наведеними вище значеннями контактних напружень для моделювання контакту «колесо-рейка» на лабораторному стенді.

Для того щоб в лабораторних умовах змодельювати контакт «колесо-рейка» в криволінійній ділянці колії, необхідно перерахувати параметри модельних зразків таким чином, щоб максимальні контактні напруження в «модельному» контакті відповідали максимальним контактним напруженням в реальному контакті.

Для визначення раціональної шорсткості контактуючих поверхонь в лабораторних умовах також необхідно формувати параметри шорсткості поверхонь, тобто підібрати зернистість абразивного матеріалу, яким вони будуть оброблятися.

Перед виконанням лабораторних випробувань були обрані наступні діапазони зміни параметрів шорсткості поверхонь:  $R_z = 1...4$  мкм. Відповідно до цих значень було обрано шліфувальний папір P150, P220, P320, P500. Перед виконанням кожної наступної серії випробувань виготовлені модельні зразки оброблялись обраним для даної серії випробувань шліфувальним папером для отримання контактуючих поверхонь з шорсткістю  $R_a = 1, 2, 3, 4$  мкм, а також при різних навантаженнях  $N = 7, 10, 13$  кг. Матеріали для виготовлення модельних зразків контактуючих тіл обирались відповідно до матеріалів колеса та рейки.

Згідно робіт з трибології [24, 25], відомо, що прогнозувати темп зношування деталей тертя опосередковано можна за рахунок експериментального визначення сили тертя в контакті. Такий загальноприйнятий підхід дозволяє зменшити трудомісткість досліджень та одночасно підвищити точність та інформативність результатів вимірювань.

Для вимірювання максимальної сили та коефіцієнту тертя в контакті використаний лабораторний стенд (рис. 4).

Стенд дозволяє імітувати контакт «колесо-рейка» за схемою «диск-площина». Диск має сферичну поверхню

катання, що дозволяє відтворити процес кочення колеса по рейці в умовах одноточкового контакту.

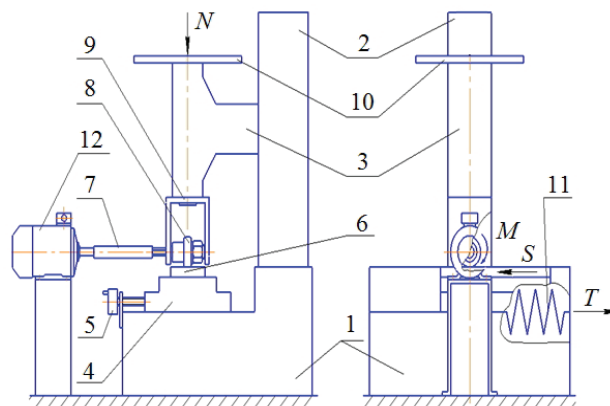


Рис. 4. Схема лабораторного стенду: 1 — станина; 2 — напрямна колонка; 3 — кронштейн; 4 — рухома платформа; 5 — маховик поперечної подачі; 6 — зразок рейки (пластина); 7 — приводний вал; 8 — зразок колеса (ролик); 9 — рама ролика; 10 — місце прикладення навантаження; 11 — пружина; 12 — електродвигун

Методика проведення експерименту передбачає прикладення вертикального зусилля  $P$  до ролика, яке в перерахунок співвідношення розмірів реального контакту «колесо-рейка» в криволінійній ділянці колії метрополітену відповідає тим же характеристикам для лабораторних моделей. За допомогою приводного валу до ролика від електричного двигуна подається постійний крутний момент  $M$ . Під рухомою платформою до станини прикріплений лінійний потенціометр. Бігунок потенціометра з'єднаний з предметним столом і переміщається разом з ним. До потенціометра приєднаний цифровий перетворювач, який має можливість підключення до комп'ютера через USB-вихід. Цифровий перетворювач, пружини і лінійний потенціометр разом представляють собою цифровий динамометр. Під час проведення дослідів сигнал з цифрового динамометра виводиться на монітор комп'ютера у вигляді графіка, що описує залежність сили тертя ролика від переміщення стола.

Таблиця 1

Результати досліджень на машині тертя за умов сухого контакту

| R <sub>a</sub>         | Коефіцієнт тертя f <sub>тр</sub> |       |       |       |       |       |       |       |       |       | f <sub>тр</sub> |
|------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
|                        | 1                                | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |                 |
| При P = 7 кгс          |                                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                 |
| R <sub>a</sub> = 1 мкм | 0,252                            | 0,255 | 0,254 | 0,253 | 0,256 | 0,257 | 0,258 | 0,26  | 0,259 | 0,261 | 0,255           |
| R <sub>a</sub> = 2 мкм | 0,233                            | 0,234 | 0,233 | 0,234 | 0,235 | 0,237 | 0,237 | 0,239 | 0,241 | 0,24  | 0,235           |
| R <sub>a</sub> = 3 мкм | 0,237                            | 0,239 | 0,24  | 0,238 | 0,239 | 0,237 | 0,239 | 0,242 | 0,241 | 0,24  | 0,239           |
| R <sub>a</sub> = 4 мкм | 0,242                            | 0,244 | 0,241 | 0,244 | 0,246 | 0,248 | 0,246 | 0,247 | 0,244 | 0,248 | 0,245           |
| При P = 10 кгс         |                                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                 |
| R <sub>a</sub> = 1 мкм | 0,259                            | 0,262 | 0,26  | 0,262 | 0,262 | 0,258 | 0,262 | 0,266 | 0,263 | 0,264 | 0,262           |
| R <sub>a</sub> = 2 мкм | 0,235                            | 0,238 | 0,234 | 0,237 | 0,239 | 0,24  | 0,241 | 0,237 | 0,236 | 0,237 | 0,237           |
| R <sub>a</sub> = 3 мкм | 0,237                            | 0,241 | 0,237 | 0,239 | 0,243 | 0,239 | 0,242 | 0,242 | 0,243 | 0,243 | 0,241           |
| R <sub>a</sub> = 4 мкм | 0,245                            | 0,249 | 0,241 | 0,246 | 0,244 | 0,249 | 0,246 | 0,248 | 0,251 | 0,253 | 0,247           |
| При P = 13 кгс         |                                  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                 |
| R <sub>a</sub> = 1 мкм | 0,261                            | 0,26  | 0,263 | 0,265 | 0,267 | 0,264 | 0,265 | 0,268 | 0,267 | 0,264 | 0,265           |
| R <sub>a</sub> = 2 мкм | 0,238                            | 0,239 | 0,242 | 0,243 | 0,241 | 0,245 | 0,242 | 0,243 | 0,239 | 0,24  | 0,241           |
| R <sub>a</sub> = 3 мкм | 0,245                            | 0,245 | 0,247 | 0,244 | 0,244 | 0,243 | 0,243 | 0,246 | 0,243 | 0,246 | 0,245           |
| R <sub>a</sub> = 4 мкм | 0,249                            | 0,25  | 0,253 | 0,254 | 0,251 | 0,25  | 0,251 | 0,253 | 0,249 | 0,254 | 0,252           |



За даними кожної серії вимірювань розраховується середня сила тертя, а потім розраховується середній коефіцієнт тертя для кожної серії випробувань (табл. 1).

Значення середнього коефіцієнту тертя для всього розглянутого діапазону шорсткостей контактуючих поверхонь зображено на (рис. 5).

Використовуючи отримані значення мікрогеометрії контактуючих поверхонь в парі тертя «колесо-рейка» визначимо значення інтенсивності зношування в «модельному» контакті за результатами випробувань на лабораторному стенді (рис. 6).

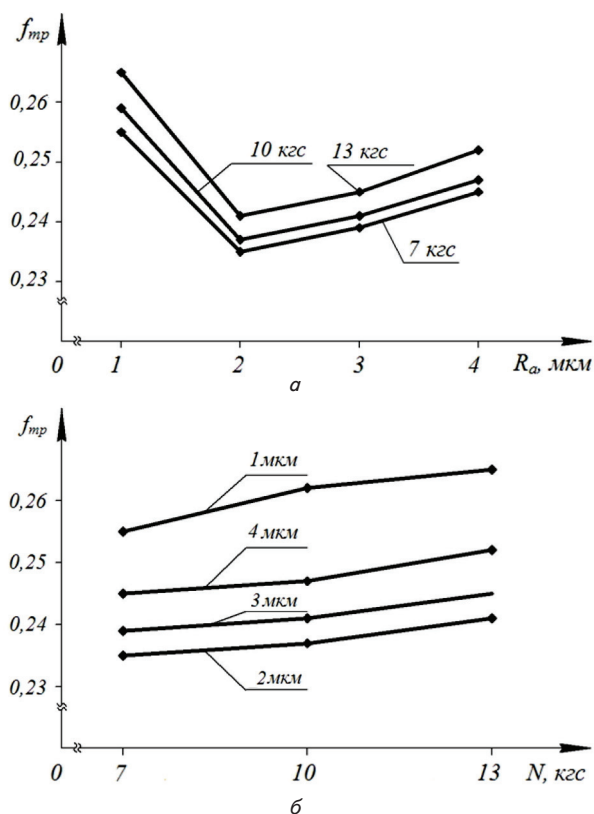


Рис. 5. Графічне відображення результатів випробувань для умов сухого тертя: а — залежність коефіцієнту тертя від шорсткості контактуючих поверхонь; б — залежність коефіцієнту тертя від вертикального навантаження при заданій шорсткості контактуючих поверхонь

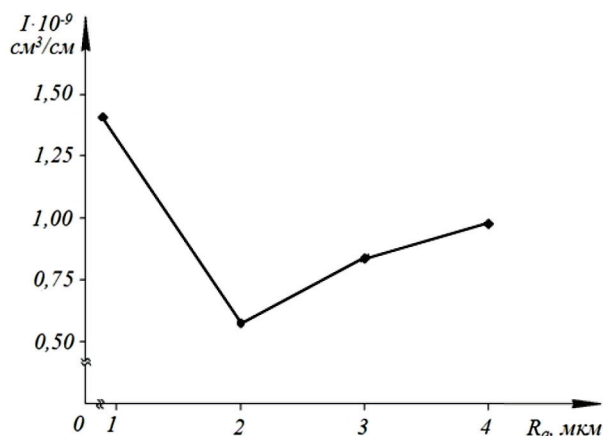


Рис. 6. Значення інтенсивності зношування в «модельному» контакті «колесо-рейка» за результатами випробувань на лабораторному стенді

Наведені на рис. 6 точкові діаграми відображають значення інтенсивності зношування бокової поверхні голівки рейки метрополітену в залежності від шорсткості контактуючих поверхонь.

##### 5. Результати досліджень з визначення раціональної шорсткості контактуючих поверхонь в контакті «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену та їх обговорення

Аналіз попередніх досліджень в області контактної взаємодії трібосистеми «колесо-рейка» дав змогу застосувати методологічний підхід при виконанні дослідження впливу шорсткості контактуючих поверхонь на трібологічні властивості контакту «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену. Згідно такого підходу при виконанні лабораторних «модельних» випробувань доцільно вимірювати силу тертя ковзання, а за встановленими даними вести розрахунок коефіцієнту тертя та інтенсивності зношування.

Лабораторні дослідження довели, що шорсткість контактуючих поверхонь суттєво впливає на сили тертя в «модельному» контакті, при чому існує область мінімуму тертя при встановленому значенні шорсткості, яке дорівнює 2  $\mu m$ . При цьому значенні параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь інтенсивність зношування набуває значення  $I = 0,53 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{cm}$ .

Отримані результати лабораторних досліджень застосовані при проведенні експлуатаційних випробувань рейок метрополітену з метою розробки технології превентивного рейкошліфування в криволінійних ділянках колії метрополітену, що забезпечить мінімум витрат на тертя та зношування.

Для подовження строків служби рейок які експлуатуються в коліях метрополітену необхідно створити такі умови їх взаємного контактування, які б давали можливість експлуатації в якомога довші терміни без шкоди для безпеки та безперебійності процесів перевезення пасажирів [1]. Для цього необхідно слідкувати за зносом контактуючих поверхонь та в разі необхідності виконувати відповідні дії зі зменшення зношування рейок в криволінійних ділянках колії метрополітену, так як саме в цих умовах рейки схильні до інтенсивного зносу. Суттєво уповільнити процес дефектоутворення рейок можливо користуючись саме трібологічними методами [8].

Результати, отримані після проведення лабораторних випробувань, підтвердили думку про те, що існує чітка залежність між шорсткістю контактуючих поверхонь та коефіцієнтом тертя і, як наслідок, впливає на інтенсивність зношування в трібоконткті «колесо-рейка». Також підтверджується думка багатьох вчених про те, що існуюча між коефіцієнтом тертя і ступенем шорсткості залежність має вигляд кривої U-образного типу з перегином в точці мінімального значення коефіцієнту тертя, якій відповідає саме раціональне, з точки зору трібології контакту, значення шорсткості.

Використовуючи отримані в лабораторних умовах значення раціональних параметрів мікрогеометрії контакту «колесо-рейка» в умовах контактування в криволінійній ділянці колії метрополітену можливо розробити методику превентивного рейкошліфування рейок колій КП «Харківський метрополітен» (Україна) для попередження надінтенсивного їх зношування. Проте результа-

ти, отримані в лабораторних умовах, необхідно порівняти з відповідними значеннями, які будуть отримані в «польових» випробуваннях на коліях метрополітену. Дана робота є продовженням та практичною реалізацією робіт [8, 16]. Дослідження з визначення раціональних параметрів мікрогеометрії контактуючих поверхонь колеса та рейки будуть проведені також в умовах метрополітену для уточнення та співставлення результатів з отриманими в лабораторних умовах. В результаті це дасть змогу отримати раціональні параметри шорсткості контактуючих поверхонь в контакті «колесо-рейка» та розробити методику превентивного рейкошліфування в КП «Харківський метрополітен» (Україна).

## 6. Висновки

відності до даної чистоти значення коефіцієнту тертя буде мінімальним  $f_{тр} = 0,241$ . Інтенсивність зношування становитиме  $I = 0,53 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{см}$ .

Проаналізувавши дослідження в області контактної взаємодії трібосистеми «колесо-рейка» для зменшення зносу контактуючих поверхонь в даній роботі вирішено деякі питання:

1. Визначені величини контактних напружень  $\sigma = 1536,25 \text{ МПа}$ , які діють в криволінійних ділянках колії метрополітену з урахуванням дії бічних сил.

2. Визначений діапазон значень сили  $P = 7, 10, 13 \text{ кгс}$ , яку необхідно прикласти до «модельного контакту», для відтворення на лабораторному стенді силової дії на контакт «колесо-рейка» в криволінійних ділянках колії метрополітену.

3. Знайдено параметри раціональної шорсткості бокової поверхні голівки рейки в криволінійних ділянках колії метрополітену, яка склала  $R_a = 2 \text{ мкм}$ . За умов обробки контактуючих поверхонь колеса та рейки в відпо-

## Література

1. Штомпель, А. М. Проблема рівноресурсності елементів верхньої будови безстикової колії [Текст] / А. М. Штомпель, О. О. Скорик, О. О. Овчинников // Сборник научных трудов SWorld. — 2014. — Т. 1, Вып. 3(36). — С. 64–69.
2. Wang, W.J. Wear and damage transitions of wheel and rail materials under various contact conditions [Text] / W.J. Wang, R. Lewis, B. Yang, L. Guo, Q. Liu, M. Zhu // Original Research Article Wear. — 2016. — Vol. 362–363. — P. 146–152. doi: 10.1016/j.wear.2016.05.021
3. Santamaria, J. Wheel-rail wear index prediction considering multiple contact patches [Text] / J. Santamaria, E. G. Vadillo, O. Oyarzabal // Original Research Article Wear. — 2009. — Vol. 267, Issue 5–8. — P. 1100–1104. doi: 10.1016/j.wear.2008.12.040
4. Ignesti, M. Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems [Text] / M. Ignesti, M. Malvezzi, L. Marini, E. Meli, A. Rindi // Original Research Article Wear. — 2012. — Vol. 284–285. — P. 1–17. doi: 10.1016/j.wear.2012.01.020
5. Alonso, A. Wheel-rail contact: Roughness, heat generation and conforming contact influence [Text] / A. Alonso, J. G. Gimenez // Tribology International. — 2008. — Vol. 41, Issue 8. — P. 755–768. doi: 10.1016/j.triboint.2008.01.004
6. Remington, P. Estimation of wheel/rail interaction forces in the contact area due to roughness [Text] / P. Remington, J. Webb // Journal of sound and vibration. — 1996. — Vol. 193, Issue 1. — P. 83–102. doi: 10.1006/jsvi.1996.0249
7. Rovira, A. Experimental and numerical modelling of wheel-rail contact and wear [Text] / A. Rovira, A. Roda, M. B. Marshall, H. Brunskill, R. Lewis // Original Research Article Wear. — 2011. — Vol. 271, Issue 5–6. — P. 911–924. doi: 10.1016/j.wear.2011.03.024
8. Воронин, С. В. Анализ существующих способов уменьшения бокового износа рельсов в паре трения «колесо-рельс» в кривых участках пути [Текст] / С. В. Воронин, Е. Н. Коростелёв // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2014. — № 3. — С. 22–27.
9. Chen, H. Influence of axle load on wheel/rail adhesion under wet conditions in consideration of running speed and surface roughness [Text] / H. Chen, A. Namura, M. Ishida, T. Nakahara // Original Research Article Wear. — 2016. doi: 10.1016/j.wear.2016.05.012
10. Агарков, О. В. Визначення контактних напружень в рейках типу Р50, які експлуатуються в метрополітені [Текст]: зб. наук. пр. / О. В. Агарков, Р. М. Йосифович // «Наука та прогрес транспорту» Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. — 2015. — № 4(58). — С. 71–86.
11. Keropyan, A. Impact of Roughness of Interacting Surfaces of the Wheel-Rail Pair on the Coefficient Of Friction in Their Contact Area [Text] / A. Keropyan, S. Gorbatyuk // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 150. — P. 406–410. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.753
12. Иванов, И. А. Оценка возможностей процессов восстановления профиля поверхности колесных пар [Текст] / И. А. Иванов, С. В. Урушев, Д. П. Кононов, А. А. Воробьев // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. — 2010. — № 10(152). — С. 72–78.

13. Будюкин А. М. Выбор режима врезного шлифования колесной стали [Текст]: сб. науч. тр. / А. М. Будюкин, И. А. Иванов, С. В. Урушев // Конструктивно-технологическое обеспечение надежности колес рельсовых экипажей, 2009. — С. 89–93.
14. Потапов, Д. О. Система шліфування рейок в колії рейкошліфувальним поїздами з активними робочими органами на залізницях України [Текст] / Д. О. Потапов, В. Г. Вітольберг // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2006. — № 5, 6. — С. 70–73.
15. Воронин, С. В. Моделирование контакта «колесо-рельс» по боковой поверхности пути на машине трения [Текст] / С. В. Воронин, С. С. Карпенко, Е. Н. Коростёлев // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. — 2014. — № 148, Ч. 2. — С. 201–204.
16. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
17. Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с.
18. Даниленко, Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом: у 2-х т. Т. 2 [Текст]: підручник / Е. І. Даниленко. — К.: Інпрес, 2010.
19. Беляев, Н. М. Соппротивление материалов [Текст] / Н. М. Беляев. — М.: Наука, 1965. — 856 с.
20. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь 3-е издание переработанное и дополненное [Текст] / Г. М. Шахунянц. — М.: Транспорт, 1987. — 479 с.
21. Альбрехт, В. Г. Основы устройства и расчетов железнодорожного пути [Текст] / В. Г. Альбрехт, М. П. Смирнов, В. Я. Шульга и др.; под ред. С. В. Амелина, Т. Г. Яковлевой. — М.: Транспорт, 1990. — 367 с.
22. Яковлев, В. Ф. Исследование контактных напряжений в элементах колеса и рельса при действии вертикальных и касательных сил [Текст] / В. Ф. Яковлев // Труды ЛИИЖТ. — 1967. — № 187. — С. 3–89.
23. Крагельский, И. В. Трение изнашивание и смазка [Текст] / И. В. Крагельский, В. В. Алисин. — М.: Машиностроение, 1978. — 400 с.
24. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики: В 2-х ч. Ч. 1 [Текст]: уч. пос. / Л. А. Сосновский. — Гомель: БелГУТ, 2003. — 246 с.